



**Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**  
[www.anuario.igeo.uff.br](http://www.anuario.igeo.uff.br)

**Caracterização Hidrogeoquímica e Isotópica do Aquífero  
Costeiro do Distrito de Tamoios/Cabo Frio-RJ**  
Hydrogeochemical and Isotopic Characterization of Coastal  
Aquifer in Tamoios District/Cabo Frio-RJ

Luana Alves de Lima<sup>1</sup>; Daniela Vasconcelos Machado<sup>2</sup>; Hullysses Sabino<sup>3</sup> & Juliana Menezes<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto e Departamento de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Av. Um, nº 4.050, 39447-790, Janaúba, MG, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Av. Athos da Silveira, nº 274, 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento Geografia, Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/no, 24210-346, Niterói, RJ, Brasil

<sup>4</sup>Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Análise Geoambiental, Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº, 24210-346, Niterói, RJ, Brasil

E-mails: [luanalimageol@gmail.com](mailto:luanalimageol@gmail.com); [dvasconcelos@id.uff.br](mailto:dvasconcelos@id.uff.br); [hsabino@id.uff.br](mailto:hsabino@id.uff.br); [juliana\\_menezes@id.uff.br](mailto:juliana_menezes@id.uff.br)

Recebido em: 01/04/2020 Aprovado em: 20/10/2020

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_4\\_218\\_228](http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_218_228)

## Resumo

O aquífero costeiro do distrito de Tamoios- Cabo Frio/RJ ocorre em uma região de contínuo crescimento urbano provocado pelo turismo e pela influência da indústria petrolífera. O Distrito de Tamoios contém uma região homogênea de aquíferos costeiros limitados pelo Rio São João ao Norte e o Rio Una ao sul. Carente de políticas públicas de saneamento e abastecimento, a captação de água subterrânea por poços é recorrente na região. Utilizando isótopos estáveis ambientais ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), análise físico-química e química da água subterrânea e superficial da região, foi possível determinar a qualidade das águas, possíveis fontes de salinização e de recarga. Os resultados indicam que as assinaturas hidroquímicas das águas subterrâneas são semelhantes entre si sendo o tipo hidroquímico predominante bicarbonatada – cálcica, enquanto que as amostras dos rios Una e São João apresentaram tipo cloretada - sódica com forte influência da composição marinha devido à proximidade com a foz. A composição isotópica demonstrou que as águas subterrâneas apresentam coeficiente angular semelhante à água da chuva enquanto que as águas superficiais denotam enriquecimento dos isótopos pesados influenciado por processos evaporativos. Dessa forma as águas subterrâneas do distrito de Tamoios apresentam composição típica de água doce continental e de trânsito rápido com recarga direta da precipitação. Os dados obtidos neste trabalho poderão ser utilizados no auxílio a gestão de avaliação e monitoramento da água subterrânea do distrito de Tamoios.

**Palavras-chave:** *aquífero costeiro; isótopos estáveis ambientais; água subterrânea*

## Abstract

The coastal aquifer of the Tamoios-Cabo Frio / RJ district occurs in a region of continuous urban growth caused by tourism and the influence of the oil industry. The Tamoios District contains a homogeneous region of coastal aquifers, bordered by the São João River to the north and Rio Una to the south. Devoid of public sanitation and supply policies, groundwater abstraction from wells is recurrent in the region. Using stable environmental isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ ), physical-chemical and chemical analysis of groundwater and surface water in the region, it was possible to determine the water quality, possible sources of salinization and recharge. The results indicate that the groundwater hydrochemical signatures are similar to each other being the predominant bicarbonate - calcic hydrochemical type, while the samples of the Una and São João Rivers presented a chlorinated - sodium type with a strong influence of the marine composition due to the proximity to the mouth. The isotopic composition showed that groundwater has an angular coefficient similar to rainwater while surface water denotes heavy isotope enrichment influenced by evaporative processes. Thus, the groundwater of Tamoios district presents a typical composition of continental freshwater and fast traffic with a direct recharge of precipitation. The data obtained in this study will be used to assist the management of assessment and monitoring of groundwater in the district of Tamoios.

**Keywords:** *coastal aquifers; environmental stable isotopes; groundwater*

## 1 Introdução

Localizado no município de Cabo Frio (RJ), o distrito de Tamoios apresenta grande pressão ambiental em relação aos seus recursos hídricos por conta da relativa escassez dos mesmos e, principalmente, pelo intenso crescimento populacional e fluxo de veranistas. A falta de ordenamento público reflete seus impactos no meio ambiente, onde a degradação ambiental já afeta a qualidade da água superficial e subterrânea deste distrito (Sabino *et al.*, 2020).

O aquífero costeiro do distrito de Tamoios ocorre em área de crescimento urbano desenfreado estimulado pela vocação turística e pela indústria do petróleo. A região detém cerca de 70% dos *royalties* (R\$ 107 milhões) que o município de Cabo Frio recebe do setor petrolífero (Brasil, 2019), o que atrai maior contingente populacional para o distrito e consequentemente maior uso do aquífero da região. Ressalta-se que o distrito de Tamoios possui baixo índice de saneamento básico e abastecimento público de água deficitário, onde a água subterrânea passa a ser amplamente utilizada como alternativa de abastecimento (Lima *et al.*, 2012).

A maior parte da vegetação natural local foi desmatada e os rios foram canalizados para dar lugar a terras de pastagem e atividades agrícolas. Ocorrem duas bacias hidrográficas no distrito que recebem todos os dejetos e escoamento rural e urbano: a bacia do rio São João, ao norte, e a do rio Una, ao sul, sendo estes rios os limites do aquífero de Tamoios. Próximo à linha de costa cavas de mineração de areia, da década de 1990, tornaram-se lagoas artificiais. Atualmente, estas lagoas recebem esgoto *in natura* da população residente local. As águas das lagoas possuem grande potencial de interação com a água subterrânea, o que pode afetar diretamente a qualidade do manancial subterrâneo e, consequentemente, a saúde de seus consumidores.

Somada a essas questões, em ambientes costeiros ocorre a problemática do bombeamento excessivo de poços que gera o deslocamento da água do mar em direção aos aquíferos, movimento este conhecido como intrusão da cunha salina (Hem, 1985). O fenômeno da intrusão salina já foi relatado em diversos estudos realizados em aquíferos costeiros do estado do Rio de Janeiro (Silva Júnior *et al.*, 2000; Almeida & Silva Júnior, 2007; Tapia *et al.*, 2010). Os dados coletados nos trabalhos de Tubbs *et al.* (2012) e Rosa *et al.* (2012) sobre a hidrogeoquímica de Tamoios não apontaram para a ocorrência de cunha salina na região, apesar de detecções pontuais de altas concentrações de cloreto em algumas amostras rasas e profundas, as quais necessitam de mais análises para melhor detalhamento do comportamento químico.

As águas subterrâneas do distrito de Tamoios encontram-se em um cenário de grande degradação ambiental

e estão sujeitas principalmente a contaminantes provenientes do saneamento básico (Lima *et al.*, 2012; Sabino *et al.*, 2020). Contudo, o recurso hídrico subterrâneo dessa região é amplamente explorado pela poluição local. Nesse sentido, este estudo visa avaliar os isótopos ambientais estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), análises físico-químicas, como pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD) e temperatura (T), além das químicas ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) das águas superficiais e do aquífero raso costeiro de Tamoios a fim de determinar sua característica hidrogeoquímica, origens da salinização e fontes de recarga. E, com isso, poder auxiliar na gestão de avaliação e monitoramento da água subterrânea desse distrito.

## 2 Área de Estudo

A área de estudo está inserida no Distrito de Tamoios pertencente ao município de Cabo Frio, limitada ao Sul pelo Município de Araruama, ao Norte pelo Distrito de Barra de São João pertencente ao Município de Casimiro de Abreu, a oeste pelos municípios de São Pedro da Aldeia e Araruama. A principal via de acesso é Rodovia Amaral Peixoto que corta praticamente todo o Distrito (Figura 1). Trata-se de uma região costeira com um extenso arco praial e com a presença de lagoas no seu reverso. A região é marcada por uma sucessão de cordões arenosos holocênicos que constituem aquíferos sedimentares. O clima na região é classificado como semiárido (Coe *et al.*, 2007) com pluviosidade anual em cerca de 854 mm e temperatura variando entre 20 e 26°C. A região é marcada por invernos secos e verões chuvosos. O solo na região é formado principalmente por espodossolo hidromórfico distrófico no litoral e no interior por gleissolo pouco húmico salino e argissolo amarelo (Carvalho Filho, 2000). A área mais densamente povoada encontra-se próxima à linha da costa, onde se encontram diversas cavas. O crescimento urbano de Tamoios ocorre a partir da área costeira em direção a parte interiorana do distrito (Lima *et al.*, 2012). Nas regiões interioranas, ocorrem pequenos núcleos populacionais atrelados à pecuária e atividades agrícolas.

A geologia do Distrito de Tamoios inclui afloramentos rochosos correspondentes ao Complexo da Região dos Lagos (Schmitt, 2001), que constitui as rochas do embasamento cristalino, recobertos por sedimentos associados aos depósitos fluviais e costeiros (Figura 1). Tais depósitos (pleistocênicos e holocênicos) da região de Búzios e Tamoios constituem sedimentos continentais (fluviais e pantanosos), sedimentos arenosos de paleocanais, sedimentos lagunares e de fundo de baía e areias marinhas litorâneas (Martin *et al.*, 1997). Estes últimos exibem morfologia de alinhamentos de antigos cordões litorâneos, como, por exemplo, a planície litorânea dos rios São João e Una, localmente retrabalhados por ação eólica, de forma que há a predominância de cordões litorâneos holocênicos (Figura 1).

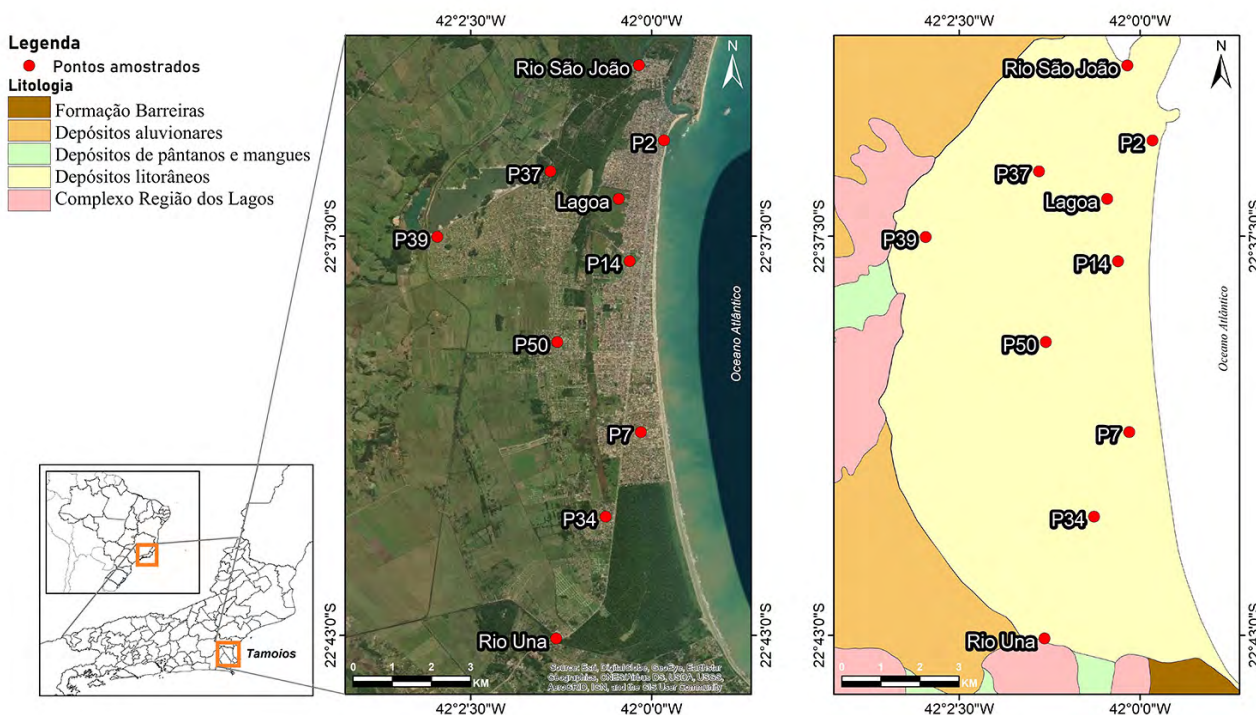


Figura 1 Localização dos pontos amostrados e da geologia local. Fonte: mapa político do Brasil e RJ (IBGE, 2010), imagem de satélite (Google Earth) e mapa geológico (CPRM, 2019).

### 3 Materiais e Métodos

Os dados deste trabalho foram coletados na campanha de campo que ocorreu em agosto de 2010. Nesta época, a Região dos Lagos, onde se encontra a área de estudo, estava passando por um grande crescimento econômico e populacional por conta das atividades relacionadas ao setor petrolífero e do turismo. Sendo assim, os dados deste trabalho se referem a uma época em que os processos de contaminação e degradação do meio subterrâneo, como a partir do uso generalizado de poços e de fossas e lançamento de esgoto na lagoa artificial, estavam se intensificando juntamente com a expansão da mancha urbana da região.

A campanha de campo teve como objetivos o reconhecimento da área de estudo, o cadastro de poços, coleta de amostras e a medição dos parâmetros físico-químicos *in situ* tais como pH, temperatura (T), condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD). Foi realizada a seleção e coleta de 10 amostras de água para análise de parâmetros físico-químicos e isotópicos ambientais ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), onde 7 correspondem às amostras de água subterrânea coletadas em poços de moradores locais, e 3 amostras de água superficial correspondente ao rio São João (RSJ), rio Uma (RU) e uma lagoa artificial (LA) (Figura 1).

A profundidade dos poços amostrados variou de 3 a 4 metros, podendo chegar até a profundidade máxima de

6 metros, sendo representativas do aquífero costeiro raso estudado. As amostras foram armazenadas em ambiente refrigerado e, no mesmo dia da coleta, foram enviadas ao laboratório designado à análise onde foram realizados os procedimentos de acidificação e filtragem. As amostras dos pontos superficiais foram igualmente coletadas, armazenadas e identificadas em frascos específicos para cada tipo de análise. A medição dos parâmetros físico-químicos foi realizada com um medidor portátil (Hanna Instruments modelo HI98130).

A análise química dos íons maiores ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) foi realizada com os métodos EPA 9056 e USEPA 6020 e a análise microbiológica através do método APHA, AWWA, WEF, ambos realizado pela Empresa *Analytical Solutions (ANASOL)*. Para a análise das razões isotópicas de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e deutério ( $\delta^2\text{H}$ ) utilizou-se o método Gás Bench realizado no Laboratório Geochronos da UNB (Universidade de Brasília).

O programa *Diagrammes*, obtido gratuitamente em sua plataforma *online* da Universidade de Avignon (2019), foi utilizado para a confecção dos gráficos hidrogeoquímicos. Os resultados referentes aos constituintes iônicos maiores foram submetidos ao cálculo do Balanço Iônico para testar a qualidade das amostras de acordo com a lei da eletroneutralidade, onde foi considerada a acurácia de 10%, de acordo com o proposto por Feitosa & Filho

(2000). As análises estatísticas foram realizadas com o *software* livre R 3.5.1 (R Core Team, 2018) e a prospecção geoquímica modelada com o auxílio do *software* Phreeqc Interactive 3.3.12 (USGS, 2017).

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Caracterização Hidrogeoquímica

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises das amostras de água subterrânea e superficial, bem como os valores mínimos, máximos, média e o desvio médio. O pH apresentou média de  $7,38 \pm 0,21$  (7,05 – 7,80) e a temperatura média foi de  $24,2 \pm 1,0$  °C (22,1 – 25,9 °C). Para a CE (583 – 1119 mS/cm) e o STD (356 – 9918 mg.L<sup>-1</sup>) a média foi de  $811 \pm 155$  mS/cm e  $1736 \pm 1913$  mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. A salinidade foi encontrada apenas no poço P34 e no rio São João, sendo estas as únicas amostras que apresentaram STD acima de 1000 mg.L<sup>-1</sup>, sendo, portanto, classificadas como águas salobras (Freeze & Cherry, 1979). As demais amostras se classificam como água doce (<1000 mg.L<sup>-1</sup>).

O erro analítico (e%) atesta a qualidade da análise e o equilíbrio do somatório de cátions e ânions. A qualidade da amostragem considerou a acurácia de no máximo 10% de erro, atestando a viabilidade das análises na área de estudo. A amostra P34 foi a única que apresentou somatório de ânions maior que o somatório de cátions, visto o valor negativo do erro analítico.

Através do diagrama de Piper (Figura 2) é possível observar que o grupo composto pelas amostras de água subterrânea da região apresenta características semelhantes, sendo o tipo hidroquímico preponderante bicarbonatadas cálcica - magnesianas representadas pelo círculo em preto.

O aumento do íon Cl<sup>-</sup> na amostra do rio São João confere a classificação cloretada-sódica que demonstra influência da água marinha. O rio Una foi classificado como o tipo cloretada sulfatada cálcica e magnesiana, apresentando altos valores de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Estas classificações podem ser explicadas pela proximidade dos pontos com a linha de costa adquiridos próximos às respectivas desembocaduras. Já a Lagoa (bicarbonatada sódica – potássica) reflete uma tendência de composição mista se destacando entre as demais amostras do aquífero raso na região.

O diagrama de semi-logarítmico de Schoeller (Figura 3), aponta para a predominância do íon bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), seguido do íon cloreto (Cl<sup>-</sup>) e este sobre o íon sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Já os cátions predominantes são o sódio (Na<sup>+</sup>) e o cálcio (Ca<sup>2+</sup>).

Do ponto de vista catiônico, o sódio (Na<sup>+</sup>) é o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais em áreas costeiras, estando normalmente associado ao cloreto. As assinaturas das amostras dos rios São João e Una ratificam o fato da influência da água do mar e a assinatura da Lagoa mostra novamente a zona de composição mista.

| ID     | pH   | T    | CE    | Sal. | STD  | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | ΣA   | ΣC   | e%    |
|--------|------|------|-------|------|------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------|------|-------|
|        |      | °C   | mS/cm |      |      |                 |                               |                               |                 |                |                  |                  |      |      |       |
| P2     | 7,30 | 25,0 | 862   | ND   | 494  | 17,9            | 29,2                          | 390,0                         | 56,9            | 82,0           | 6,6              | 80,4             | 7,5  | 9,1  | 9,8   |
| P7     | 7,80 | 24,1 | 888   | ND   | 572  | 22,4            | 0,0                           | 385,0                         | 46,2            | 31,2           | 21,5             | 80,0             | 6,9  | 8,6  | 10,5  |
| P14    | 7,05 | 25,0 | 630   | ND   | 386  | 26,0            | 59,4                          | 155,3                         | 38,2            | 8,4            | 8,2              | 53,9             | 4,5  | 5,2  | 7,5   |
| P34    | 7,63 | 23,6 | 583   | 3,0  | 3118 | 64,9            | 6,5                           | 566,5                         | 105,0           | 5,3            | 26,6             | 45,0             | 11,3 | 9,1  | -10,4 |
| P36    | 7,30 | 22,7 | 1020  | ND   | 796  | 35,4            | 12,5                          | 424,6                         | 88,2            | 4,5            | 10,8             | 91,6             | 8,2  | 9,4  | 6,8   |
| P39    | 7,24 | 25,3 | 627   | ND   | 380  | 8,4             | 28,4                          | 201,1                         | 11,4            | 2,6            | 4,0              | 77,2             | 4,1  | 4,7  | 7,0   |
| P50    | 7,36 | 25,9 | 874   | ND   | 554  | 11,4            | 0,0                           | 379,2                         | 43,9            | 4,3            | 14,7             | 91,0             | 6,5  | 7,8  | 8,6   |
| LA     | 7,05 | 25,0 | 630   | ND   | 356  | 41,5            | 21,9                          | 177,3                         | 71,5            | 10,2           | 7,4              | 28,5             | 4,5  | 5,4  | 8,8   |
| RSJ    | 7,80 | 22,1 | 1119  | 10,0 | 9918 | 169,4           | 15,8                          | 46,2                          | 128,4           | 4,1            | 13,1             | 2,8              | 5,9  | 6,9  | 8,1   |
| RU     | 7,40 | 23,5 | 875   | ND   | 790  | 185,5           | 220,2                         | 212,6                         | 54,9            | 109,3          | 83,6             | 62,6             | 13,3 | 15,2 | 6,6   |
| Min    | 7,05 | 22,1 | 583   | 3,0  | 356  | 8,4             | 0,0                           | 46,2                          | 11,4            | 2,6            | 4,0              | 2,8              |      |      |       |
| Máx    | 7,80 | 25,9 | 1119  | 10,0 | 9918 | 185,5           | 220,2                         | 566,5                         | 128,4           | 109,3          | 83,6             | 91,6             |      |      |       |
| Média  | 7,39 | 24,2 | 811   | 6,5  | 1736 | 58,3            | 39,4                          | 293,8                         | 64,5            | 26,2           | 19,6             | 61,3             |      |      |       |
| Desvio | 0,21 | 1,0  | 155   | 3,5  | 1913 | 49,0            | 40,2                          | 135,3                         | 27,1            | 28,8           | 14,5             | 23,0             |      |      |       |

Sal. = salinidade; ΣA = somatório de ânion; ΣC = somatório de cátions; LA = Lagoa artificial; RSJ = Rio São João; RU = Rio Una; Min = mínimo; Máx = máximo.

Tabela 1 Dados físico-químicos, balanço iônico (B.I) e estatística das amostras de água de Tamoios (máximo, mínimo, média e desvio médio).

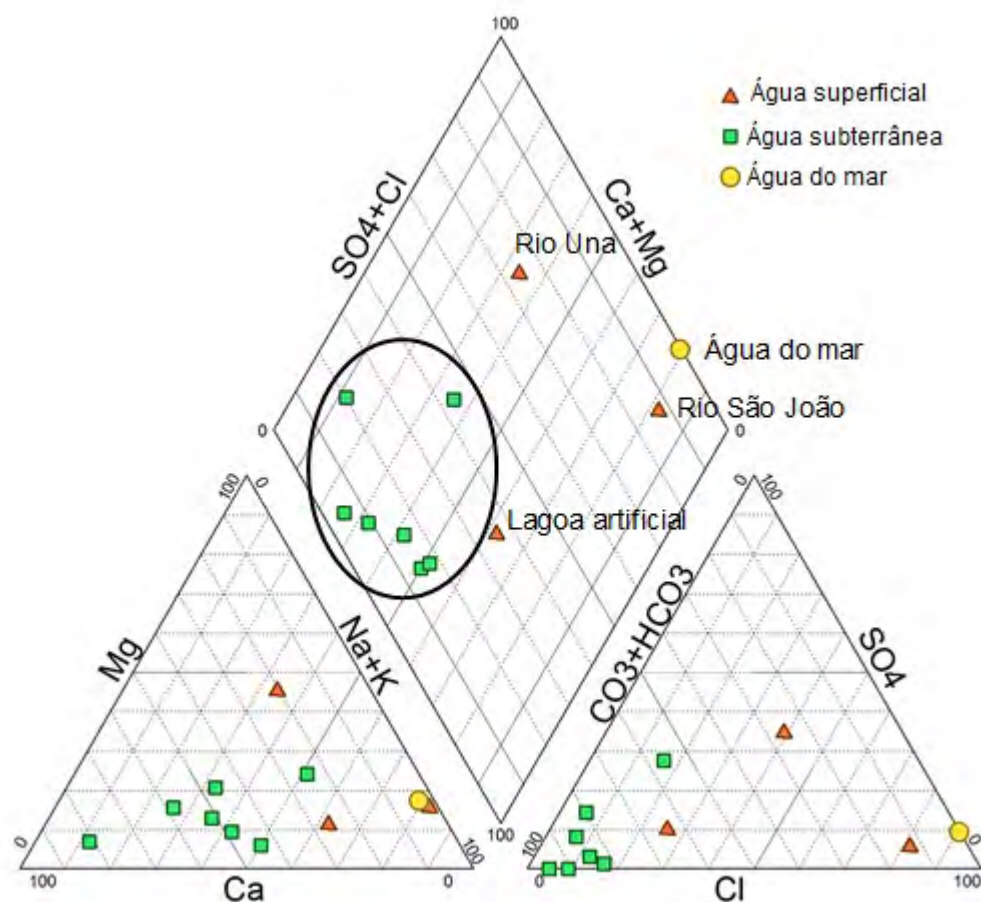


Figura 2 Diagrama de Piper expondo as facies hidroquímicas. Vermelho: Amostras de água superficial. Verde: amostras de água subterrânea. Amarelo: composição da água do mar.

A Figura 4A representa a razão do íon cloreto em relação ao sódio em  $\text{meq.L}^{-1}$ . As amostras que estão abaixo da linha traçada denotam maiores influências de águas continentais. As amostras de água subterrânea apresentam tal tendência, onde destaca-se a presença da amostra da lagoa artificial que demonstra tendência mista de influência de água marinha e continental. A amostra do rio Una e do rio São João apresentam maiores incrementos do íon cloreto, denotando mistura com águas de composição marinha, sendo o rio Una o que apresenta maior influência salina. O poço P39 foi o que apresentou menor concentração de sódio, localizado em porção mais distal da linha de costa em relação aos demais, sofrendo menos influência marinha dessa forma.

As amostras da água subterrânea apresentam baixa tendência de concentração cloreto e alta tendência de bicarbonato (Figura 4B). As amostras de água superficial dos rios Una e São João possuem significativas concentrações de cloreto e o rio São João foi o que apresentou a menor

concentração de bicarbonato entre todas as amostras analisadas.

As amostras P14 e P39 foram coletadas em poços próximos a outras lagoas que também surgiram através do processo de abandono de cavas de mineração e possuem urbanização em seu entorno (Figura 4B). Tais amostras possuem comportamento químico similar ao da amostra da lagoa artificial, o que indica que as águas das lagoas influenciam na hidroquímica do aquífero local. Através da análise de cluster vemos a similaridade dos poços P14 e P39 com a lagoa artificial, reafirmando a hipótese (Figura 5).

O coeficiente de Sperman (Tabela 2) é uma medida de correlação não paramétrica, onde correlações acima de 0,70 podem ser consideradas significativas. A boa correlação positiva do sódio com a salinidade reforça a influência desse íon na elevação do sal nas águas analisadas. A correlação positiva entre o  $\delta^{18}\text{O}$  com os íons cloreto e sódio denota a possível influência salina no aquífero, o que é esperado devido à localização costeira.



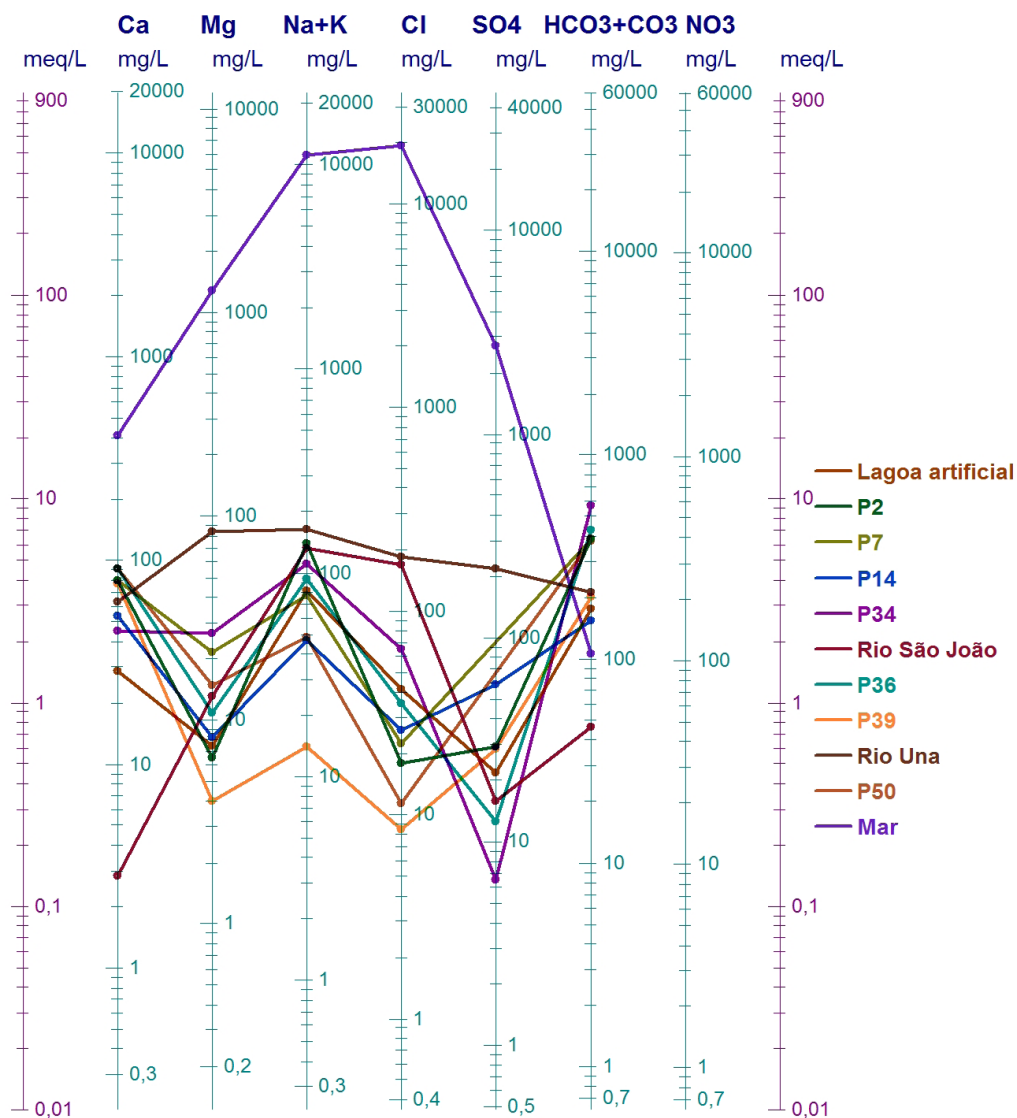


Figura 3 Diagrama de Schoeller das amostras da região de Tamoios.

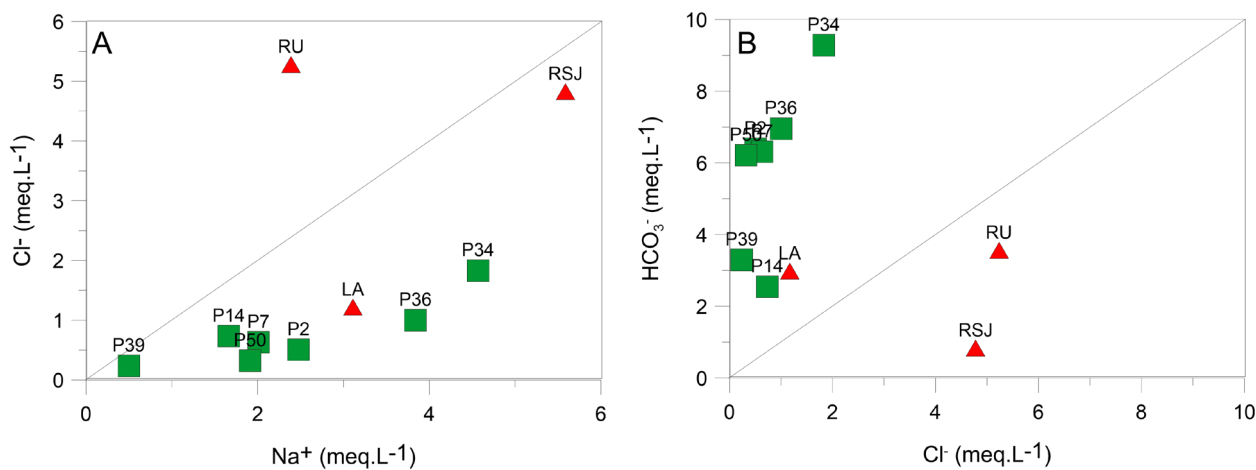


Figura 4 Razões iônicas em meq.L<sup>-1</sup>; A. Na<sup>+</sup> x Cl<sup>-</sup>; B. Cl<sup>-</sup> x HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

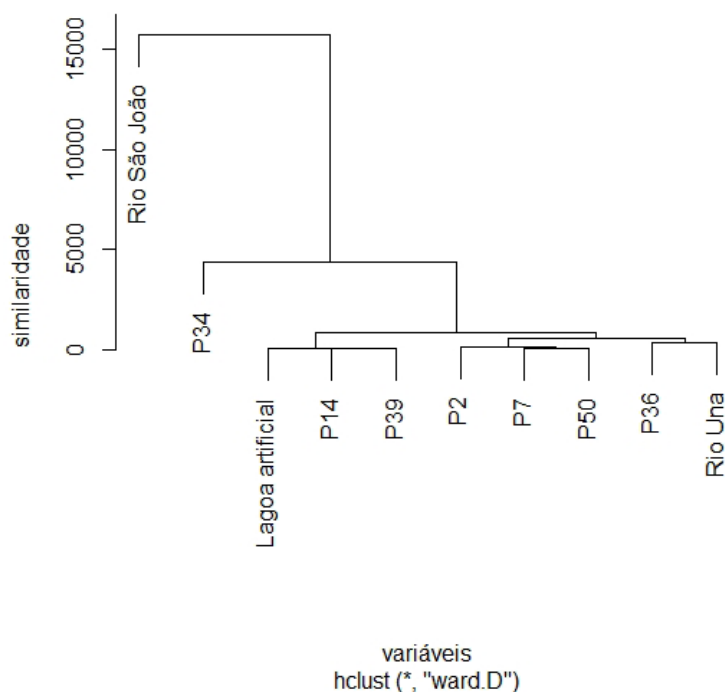


Figura 5 Análise de cluster dos pontos amostrados na região de Tamoios.

|                               | pH    | T     | STD   | *Sal. | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | δ <sup>18</sup> O |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|
| T                             | -0,54 |       |       |       |                 |                               |                               |                 |                |                  |                  |                   |
| STD                           | 0,81  | -0,80 |       |       |                 |                               |                               |                 |                |                  |                  |                   |
| *Sal.                         | 0,58  | -0,55 | 0,70  |       |                 |                               |                               |                 |                |                  |                  |                   |
| Cl <sup>-</sup>               | 0,35  | -0,80 | 0,58  | 0,53  |                 |                               |                               |                 |                |                  |                  |                   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | -0,49 | -0,01 | -0,34 | -0,24 | 0,21            |                               |                               |                 |                |                  |                  |                   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 0,25  | -0,08 | 0,31  | -0,08 | -0,13           | -0,41                         |                               |                 |                |                  |                  |                   |
| Na <sup>+</sup>               | 0,43  | -0,75 | 0,67  | 0,70  | 0,70            | -0,22                         | 0,21                          |                 |                |                  |                  |                   |
| K <sup>+</sup>                | 0,02  | -0,12 | -0,12 | -0,37 | 0,30            | 0,36                          | 0,22                          | 0,02            |                |                  |                  |                   |
| Mg <sup>2+</sup>              | 0,73  | -0,47 | 0,68  | 0,32  | 0,58            | -0,32                         | 0,28                          | 0,28            | 0,28           |                  |                  |                   |
| Ca <sup>2+</sup>              | -0,07 | 0,28  | -0,07 | -0,62 | -0,6            | -0,25                         | 0,59                          | -0,36           | 0,04           | -0,08            |                  |                   |
| δ <sup>18</sup> O             | 0,21  | -0,53 | 0,25  | 0,35  | 0,75            | 0,19                          | -0,03                         | 0,71            | 0,36           | 0,22             | -0,52            |                   |
| δ <sup>2</sup> H              | 0,39  | -0,41 | 0,28  | 0,35  | 0,70            | -0,16                         | -0,14                         | 0,53            | 0,18           | 0,52             | -0,53            | 0,82              |

Tabela 2 Correlação matricial entre os parâmetros analisados. Em verde as correlações positivas (>0,7) e em vermelho as correlações negativas (<-0,7). \*Salinidade.

## 4.2 Modelagem geoquímica

Subordinados as características físico-químicas da água, determinados minerais podem se dissolver ou precipitar. Através da modelagem geoquímica é possível determinar o índice de saturação (SI) de uma espécie mineral, onde SI > 0 indicam que a fase mineral tende a

se precipitar, e o equilíbrio entre a água e a fase mineral é dada por SI = 0 (Deutsch, 1997). O pH é um importante parâmetro que altera a distribuição relativa das espécies dissolvidas, sendo um provável parâmetro influenciador nos índices de saturação (Hem, 1985). A Figura 6 mostra os valores dos índices de saturação em função do pH do meio para cada ponto amostrado.

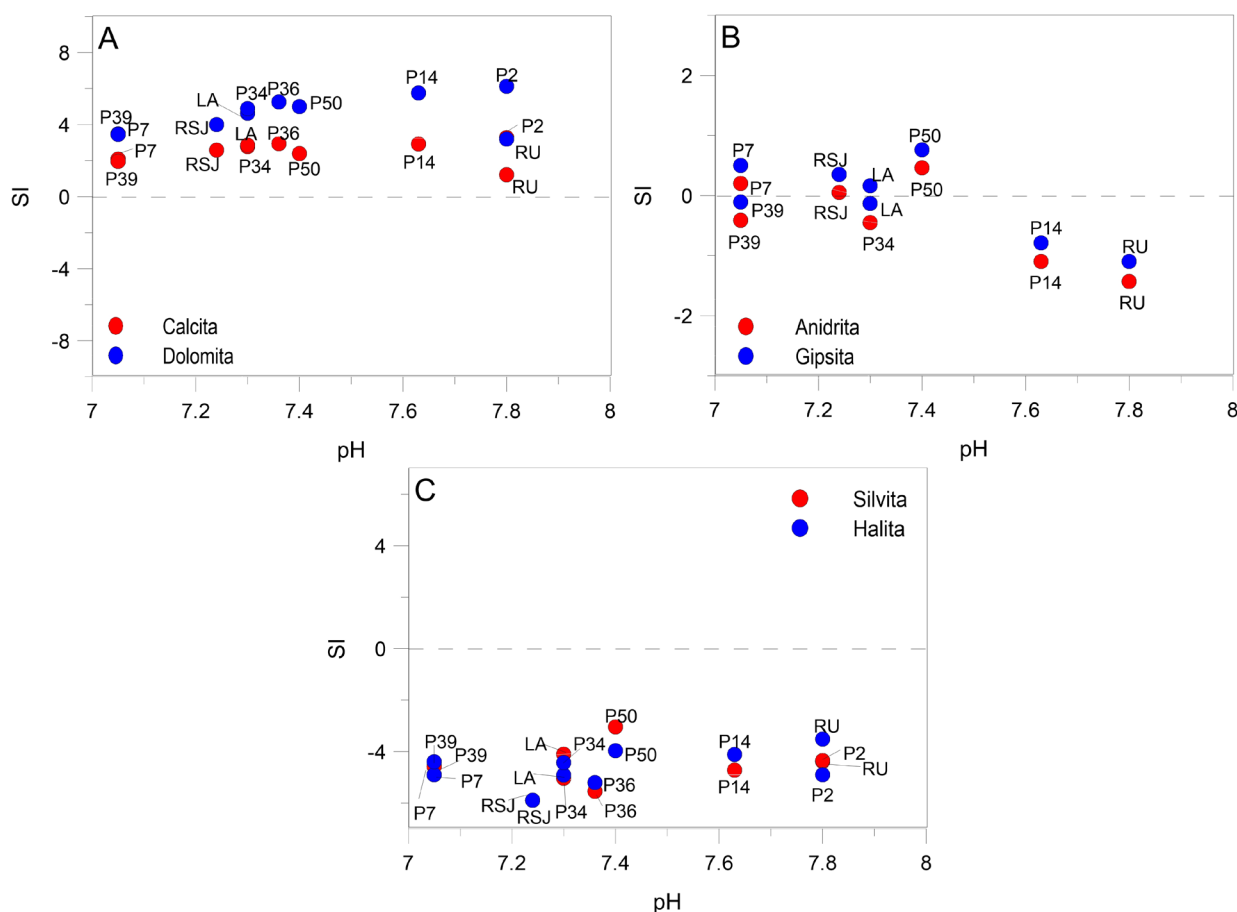


Figura 6 Índices de saturação (SI) em função o pH do meio para as amostras de água subterrânea e superficiais; A. fases carbonatadas; B. Haletos e; C. fases sulfatadas.

Os carbonatos calcita e dolomita apresentaram índice de saturação positivos para todas as amostras coletadas, indicando uma tendência à precipitação destas fases minerais (Figura 6A). A anidrita e gipsita, que são sulfatos, apresentaram SI próximos ao equilíbrio (SI = 0), sendo os poços P14 e P39, juntamente com rio Una, apresentando índices levemente positivos (Figura 6B). Os minerais halita e silvita, sais de NaCl e KCl respectivamente, se encontram em fase dissolvidas nas águas de Tamoio para todas as amostras (Figura 6C).

### 4.3 Análise Isotópica

Craig (1961) desenvolveu o SMOW (*Standard Mean Ocean Water*), que é um padrão de medida de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ . Posteriormente, a IAEA preparou um padrão a partir da água do mar destilada que foi modificado para ter uma composição isotópica próxima ao SMOW e denominada de VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) sendo esta, a notação mais aceita internacionalmente.

A composição isotópica da água é expressa em desvio per mil (padrão VSMOW) em relação à composição isotópica da água do oceano. Dessa forma, a reta meteórica global apresenta uma correlação linear entre os isótopos de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  presentes na molécula de água, sendo essa a relação:  $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ . Águas que sofrem processos de evaporação apresentam enriquecimento em  $\delta^{18}\text{O}$  e coeficiente angular menor que a reta meteórica global. A Tabela 3 apresenta os resultados das análises isotópicas de Tamoios.

As amostras de água subterrânea analisadas neste trabalho apresentam assinatura isotópica semelhante entre si, denotando uma mesma fonte de recarga (Figura 7A). A equação da reta para as amostras de água subterrânea é  $\delta^2\text{H} = 3,7061 \times \delta^{18}\text{O} - 11,2216$ , sendo o coeficiente angular menor que a reta meteórica global, indicando que essas águas sofreram evaporação recente. É possível observar que os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam entre -4,4 a 1,5‰, o que indica a possibilidade da água subterrânea do aquífero costeiro de Tamoios ser uma mistura de águas recentes com paleoáguas.



| ID     | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ |
|--------|-----------------------|--------------------|
|        | ‰                     |                    |
| P2     | -3,75                 | -29,00             |
| P7     | -4,17                 | -25,30             |
| P14    | -4,42                 | -29,60             |
| P34    | -3,66                 | -21,40             |
| P36    | -3,96                 | -26,60             |
| P39    | -4,21                 | -27,10             |
| P50    | -4,39                 | -25,40             |
| LA     | 1,53                  | 2,40               |
| RSJ    | -2,12                 | -13,20             |
| RU     | -0,96                 | -3,30              |
| Min.   | -4,4                  | -29,6              |
| Máx.   | 1,5                   | 2,4                |
| Média  | -3,0                  | -19,9              |
| Desvio | 1,5                   | 9,1                |

Tabela 3 Valores isotópicos das amostras analisadas de Tamoios. LA = Lagoa artificial; RSJ = Rio São João; RU = Rio Una; Min = mínimo; Máx = máximo.

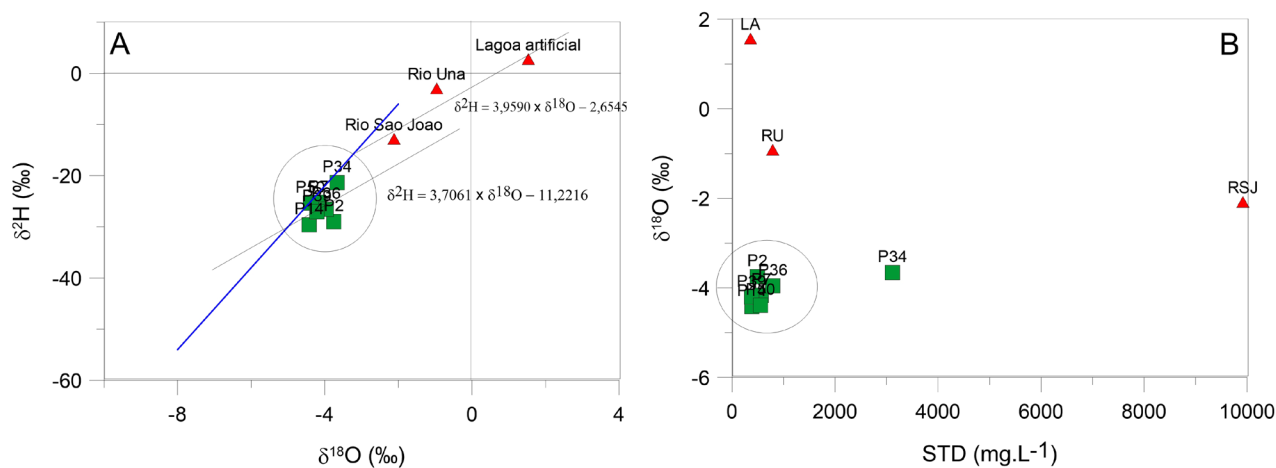


Figura 7A. Gráfico  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  das amostras de Tamoios e correlações lineares à reta meteórica global (linha azul). Em destaque as amostras de água subterrânea; B. Relação entre  $\delta^{18}\text{O}$  versus sólidos totais dissolvidos (STD). Destaque para grupo de águas do aquífero costeiro de Tamoios.

A correlação referente às amostras de água superficial (lagoa artificial, rio Una e rio São João) apresentou coeficiente angular igual a 3,9590, como visto na reta mais acima na Figura 7A. Este coeficiente demonstra que as amostras de água superficial também apresentam enriquecimento em  $\delta^{18}\text{O}$  típica de águas que sofreram processo de evaporação.

Pela correlação de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , pode-se inferir que o aquífero costeiro da região de Tamoios apresenta

recarga direta da água da chuva. Destoa dessa tendência as amostras de águas superficiais, que são mais isotopicamente enriquecidas, em especial a amostra da lagoa artificial, que apresenta razões isotópicas de 1,53‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  e 2,40‰ para  $\delta^2\text{H}$ . Os valores isotópicos das águas superficiais expõem que elas possuem origem similares. A coleta das amostras foi feita em uma época seca, o que possibilitou inferir que as águas superficiais são influenciadas pela água subterrânea.

A correlação Sólidos Dissolvidos Totais x  $\delta^{18}\text{O}$  resultou em uma clara distinção das amostras em grupos, o que é um indicativo de armazenamento diferenciado do reservatório subterrâneo e superficial (Figura 7B). O poço P34 foi a única amostra de água subterrânea que não se encontra agrupada com as demais do mesmo tipo, se distinguindo pelo alto valor de STD ( $3118 \text{ mg.L}^{-1}$ ), o que a agrupou por similaridade com a amostra do rio São João, conforme a análise de cluster (Figura 5). A amostra da lagoa artificial possui conteúdo de STD semelhante às águas subterrâneas, porém se apresenta enriquecida em relação ao isótopo pesado, indicando a predominância de processos evaporativos assim como as demais amostras dos rios da área.

## 5 Conclusões

O aquífero costeiro de Tamoios apresenta predominância de água subterrânea do tipo hidroquímico bicarbonatadas-cálcicas, típico de águas doces continentais. A amostra referente à lagoa artificial criada pelo afloramento da superfície freática estudado na região apresenta um incremento do íon cloreto, o que demonstra uma evidência de mistura de águas continentais e marinhas. As amostras do rio Una e do rio São João foram classificadas como cloretadas-sódicas, com forte influência da composição marinha. Esta característica expõe que a água do mar adentra consideravelmente nos rios e afeta sua hidroquímica, em especial no rio São João.

As assinaturas hidroquímicas das águas subterrâneas mostraram-se semelhantes, denotando conexão entre si e apontam para a predominância do ânion bicarbonato, seguido do cloreto e este sobre o sulfato. Os cátions predominantes são o sódio e o cálcio sobre o magnésio. A modelagem geoquímica indica que o aquífero costeiro apresenta tendência de precipitação de minerais de fases carbonatadas (calcita e dolomita) em seu arcabouço e instauração em relação aos haletos (halita e silvita).

A composição isotópica da água demonstrou duas correlações distintas em relação à curva meteórica global. As águas subterrâneas apresentam coeficiente angular semelhante à água da chuva, indicando que a recarga local do aquífero é pela água pluviométrica. As amostras de água superficial apresentam comportamento de enriquecimento dos isótopos pesados, sinalizando processos evaporativos. A correlação do  $\delta^{18}\text{O}$  em relação aos Sólidos Totais Dissolvidos sugere que as águas subterrâneas apresentam conexão entre si e não recebem aporte considerável dos cursos d'água superficiais da região, visto que as águas subterrâneas e superficiais apresentam assinaturas isotópicas distintas.

## 6 Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do presente estudo que integrou o projeto “Análise Integrada de Questões Ambientais: Hidrologia e Geofísica” desenvolvido pelo Laboratório de Geoprocessamento da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – LabGIS/FGEL-UERJ em parceria com a Universidade Federal Fluminense(UFF).

## 7 Referências

- Almeida, G.M. & Silva Júnior., G.C. 2007. Fatores hidrogeológicos no estudo da intrusão salina em aquíferos costeiros da região litorânea do município de Maricá – RJ. *Anuário do Instituto de Geociências*, 30(2): 104-117.
- Avignon. 2019. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon – Logiciels. Disponível em: <<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- Brasil. 2019. Royalties. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/royalties-e-outras-participacoes/royalties>>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- Carvalho Filho, A. 2000. Os Solos do Estado do Rio de Janeiro. Brasília: CPRM. Disponível em: <[http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17229/9/rel\\_proj\\_rj\\_solos.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17229/9/rel_proj_rj_solos.pdf)>. Acesso em: 21 dez. 2018.
- Coe, H.H.G.; Carvalho, C.N.; Souza, L.O.F. & Soares, A. 2007. Peculiaridades Ecológicas da Região de Cabo Frio, RJ. *Revista de Tamoios*, julho/dezembro, ano IV, nº 2.
- CPRM – GEOSGB. Sistema de Geociências do Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>>. Acesso em: 23 set. 2019.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703.
- Deutsch, W.J. 1997. *Groundwater Geochemistry*. New York, Lewis, 214 p.
- Feitosa, F.A.C. & Filho, J.M. (Coord.). 2000. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 2. ed., Fortaleza, CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 391p.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. New Jersey, Prentice Hall, 624p.
- Hem, J.D. 1985. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Washington, United States Geological Survey, 263p.
- IBGE. 2010. Instituto Brasileira de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>>. Acesso em: 23 set. 2019.
- Lima, L.A.; Calonio, L.W & Menezes, J.M. 2012. Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo e suas Implicações na Qualidade da Água Subterrânea. Estudo de Caso: Distrito de Tamoios, Cabo-Frio/RJ. *Caderno de Estudos Geoambientais*, 2(5): 2-13.

- Martin, L.; Suguio, K.; Dominguez, J.M.L. & Flexor, J.M. 1997. Geologia do Quaternário Costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Belo Horizonte, FAPESP / CPRM, 125p.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rosa, F.A.; Almeida, R.M.R. & Tubbs Filho, D. 2012. Avaliação da influência de cavas de areia na intrusão salina em aquíferos costeiros utilizando modelos matemáticos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 17, Bonito, 2012. Anais, São Paulo, ABAS, p. 1-4.
- Sabino, H.; Menezes, J. & Lima, L.A. 2020. Indexing the Groundwater Quality Index for human consumption ( $GWQI_{HC}$ ) for urban coastal aquifer assessment. *Environmental Earth Sciences*, 79(8): 167.
- Schmitt, R.S. 2001. *Orogenia Búzios - Um evento tectonometamórfico cambro-ordoviciano caracterizado no Domínio Tectônico de Cabo Frio, Faixa Ribeira - sudeste do Brasil*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 273p.
- Silva Júnior, G.C.; Lowsby, M.; Souza, M.G.A.; Rocha, P.F.; Monteiro, A.C. & Almeida, R.R. 2000. A problemática da intrusão marinha nos aquíferos costeiros do leste Fluminense: um estudo de caso - a Região Oceânica de Niterói. *In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER*, 1, Fortaleza, 2000. Artigos, Fortaleza, p. 1-19.
- Tapia, A.P.; Almeida, G.M.; Silva Junior, G.C. & Waterloo, M. 2010. Coastal aquifers of Barra de Maricá, Brazil: contamination and saline wedge behavior. *In: SALT WATER INTRUSION MEETING*, 21, 2010, Açores, Portugal. Resumos do SWIM, Açores, p. 39-42.
- Tubbs Filho, D.; Raposo, R.M. & Rosa, F.A. 2012. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do “Aquífero Tamoios” município de Cabo Frio, estado do Rio de Janeiro. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 17, Bonito, 2012. Anais, São Paulo, ABAS, p. 1-4.
- USGS. 2017. United States Geological Survey. 2017. PHREEQC Version 3. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3>>. Acesso em: 20 dez. 2018.